

ハンマーの叩打動作における 振り下ろしの軌跡と叩打力の解析

柴田 克之* 生田 宗博* 西川 弘志** 西村 誠次*

要 旨

本研究の目的は、作業療法の訓練手段として用いられるハンマー叩打動作を、ハイスピードビデオカメラによる映像と荷重変換器による歪みの変化から、ハンマーの軌跡と叩打力を求め、振り下ろし動作の基礎的データとすることである。

対象者は18名の健康男性である。ハンマーの振り下ろしの軌跡は、被験者の上前腸骨棘を原点座標として2次式 $Y = -0.03X^2 + 0.70X + 68.5$ と、1次式 $Y = -2.60X + 149$ で示すことができた。叩打力は、①振り下ろされたハンマーの運動加速度から求めた力(算出叩打力)、②叩打される目標物に荷重変換器を設置して計測した力(応打力)、③ハンマーの柄に貼った歪みゲージで計測した力(叩打反力)を各々測定した。算出叩打力：応打力：叩打反力は、1：4.2：4.3の比率で各叩打力を求めることができ、各測定システムの妥当性を示すことができた。

Key Words

Hammering, Spike force, Locus

はじめに

木工、銅板細工、革細工などハンマーを用いた叩打動作は、目と手の協調性や上肢筋力強化の訓練として用いられる。動作学的に見るとハンマーの振り下ろし動作は、上肢の肩、肘、手の3関節が連動しながら伸展する運動であり、目標物の釘や刻印棒に照準を合わせながら、力を垂直下方に加える動作である。

本実験の目的は、振り下ろし動作において、照準を目標物に合わせ動作をハンマーの運動軌跡から分析し、また叩打する力をハンマーの運動加速度から算出した力と、ハンマーの柄と叩打面の打点の歪みをそれぞれ荷重変換器で力を求め、各測定システムの妥当性を検討した。更に振り下ろしされる軌跡と叩打力の両面から、効率的な打ち肩を明示することである。

表1 対 象

| | |
|-------|------------------------------|
| 人 数 | : 18名 |
| 年 齢 | : 21.6 ± 2.4 歳 |
| 体 重 | : 62.7 ± 9.1 kg |
| 身 長 | : $(172.0 \pm 6.1)10^{-2}$ m |
| 上 腕 長 | : $(28.3 \pm 1.8)10^{-2}$ m |
| 前 腕 長 | : $(24.7 \pm 1.5)10^{-2}$ m |

方 法

1. 対 象

若年健康成人18名、平均年齢 21.6 ± 2.4 歳で被験側は右上肢とした(表1)。

2. 実験方法

被験者の測定肢位は椅子坐位とし、叩打面の高さは0.58m、座面の高さは座った被験者の上前腸骨棘が叩打面高と等しくなる高さに調節した。被験者は重量0.55kgの木製ハンマーを右手で円筒把握し、目標物のペグを1回/1秒の

* 金沢大学医療技術短期大学部・作業療法学科

** 石川県立中央病院・作業療法部

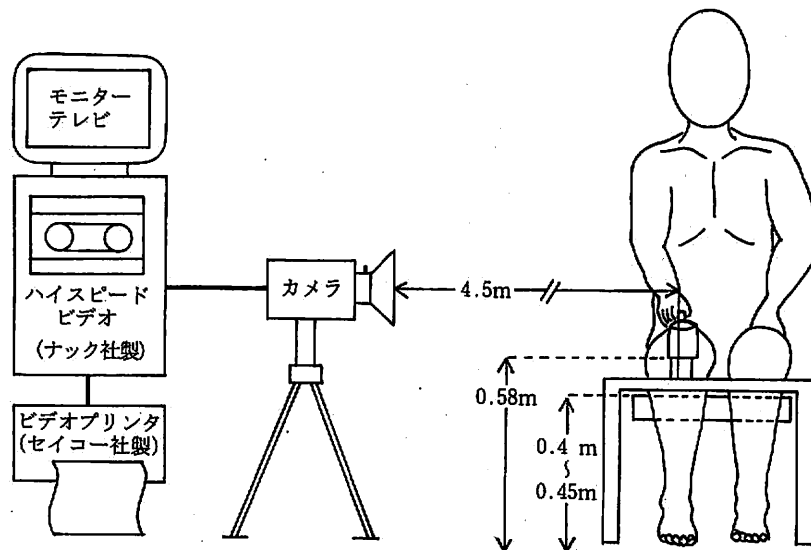


図1 叩打肢位と映像システム

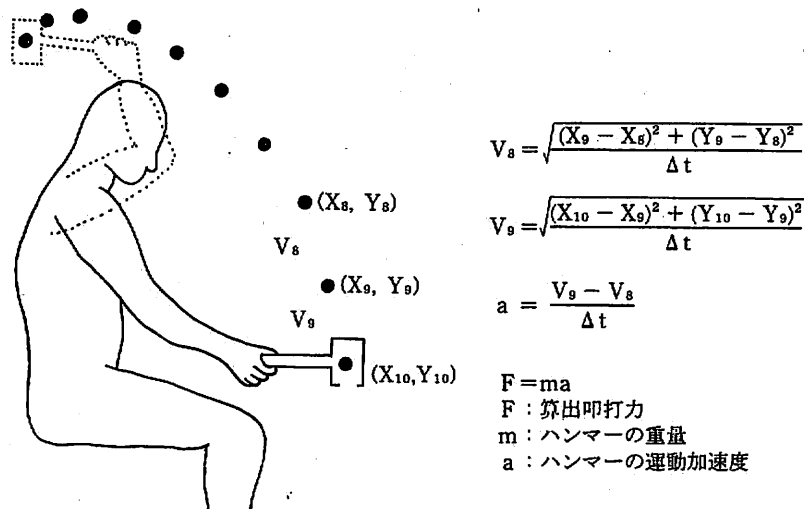


図2 算出叩打力の測定方法

頻度で大きなストロークで叩打した。ハンマー振り下ろしの動きは、ハンマーヘッドの側面中央部に付けたランドマークをハイスピード・ビデオカメラ（ナック社製 HSV-400）で撮影した（図1）。1回の振り下ろし動作時間を10分割し10画像を測定した。1画像は0.040～0.055秒間隔の範囲内で分けられ、ビデオプリンター（セイコー社製 VP-3500）で1画像毎に印画した。ハンマーの動きは、被験者の上前腸骨棘を座標原点（ X_0, Y_0 ）として、振り下ろしのハンマーの座標点（ X_n, Y_n ）をデジタイザー（ナック社製 GP-3）で計測し、ハンマーの軌跡を求めた。

叩打力は以下の3種類の方法で求めた。

第1計測法は、ハンマーの重量と運動加速度の積によって求めた力（以下算出叩打力と仮称）である。測定はハ

ンマーが目標物の打面に当る直前、つまり10分割した振り下ろしの開始から10番目（ X_{10}, Y_{10} ）と9番目（ X_9, Y_9 ）と8番目（ X_8, Y_8 ）からなる3カ所の座標点を抽出した。次に（ X_8, Y_8 ）と（ X_9, Y_9 ）の座標点の変位から速度 V_8 を求め、同様に（ X_9, Y_9 ）と（ X_{10}, Y_{10} ）から速度 V_9 を求め、速度 V_8 と V_9 の差で得られる速度変化を微分して得るハンマーの運動加速度（ a ）とハンマーの重量（ m ）（0.55 kg）を積算し、叩打力（ F ）＝ ma を求めた（図2）。

第2計測法は、叩打面の打点の歪みの大きさから求めた力（以下応打力と仮称）である。測定は打点となる目標物をロードセル（TOYO 社製 SR-4）に置き換えて、ハンマーがロードセルの打点と衝突した時の歪みを、動歪みアンプで増幅した。応打力の出力波形は1相性の陽

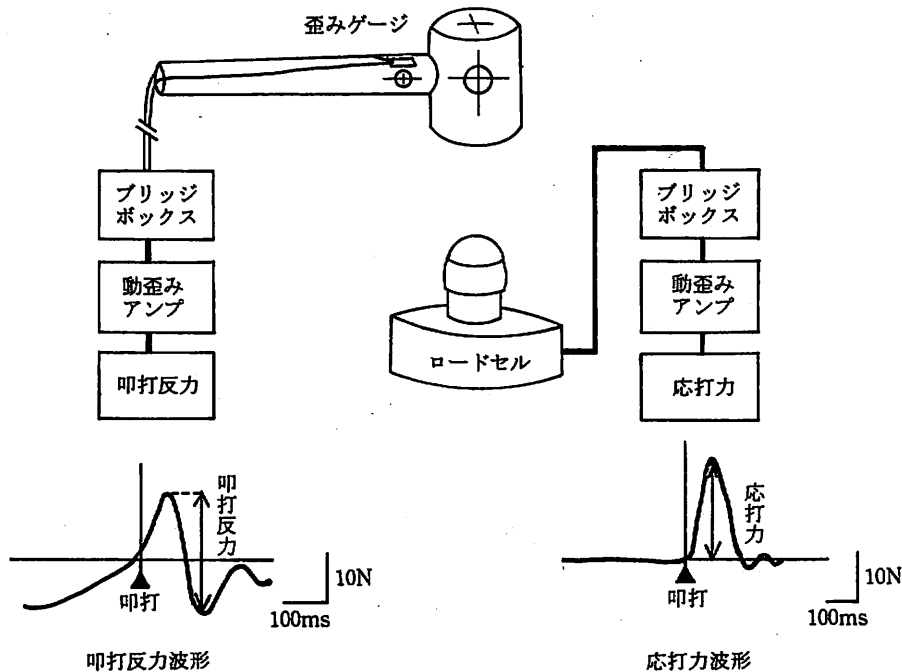


図3 叩打反力と応打力の測定方法

性波形を示し、基線から上方のピーク値を応打力として求めた(図3)。

第3計測法は、叩打した時の柄の歪みの変化から求めた力(以下叩打反力と仮称)である。測定は柄の背側部、長軸方向でハンマーヘッドの中心から5cm離れた位置に歪みゲージ(共和電業社製KFC5-1 C-11 L-100)を張りつけ、叩打した時の柄の歪みを動歪みアンプ(共和電業社製DPM-601A)で増幅した。出力された叩打反力の記録波形は、基線から上方へ振れる陽性波形と、下方へ振れる陰性波形の2相性を示し、振幅の測定部位は陽性波形と陰性波形のピーク間値を叩打反力として求めた(図3)。

応打力と叩打反力のアナログ出力波形は電磁オシログラフ(横河電気社製2932-11)で記録した。なお較正は最小0.1kgから最大40kgの重りを各センサに荷重して求めた。

結果

1. ハンマーの軌跡

被験者毎に10分割したハンマーの軌跡は、2つの近似式で表すことが出来た(図4)。

近似式で示される各測定点の標準偏差の比率(Y軸の標準偏差/X軸の標準偏差)を比較すると、2画像が7画像はY軸に対しX軸の変位が大きくなり、8画像から10

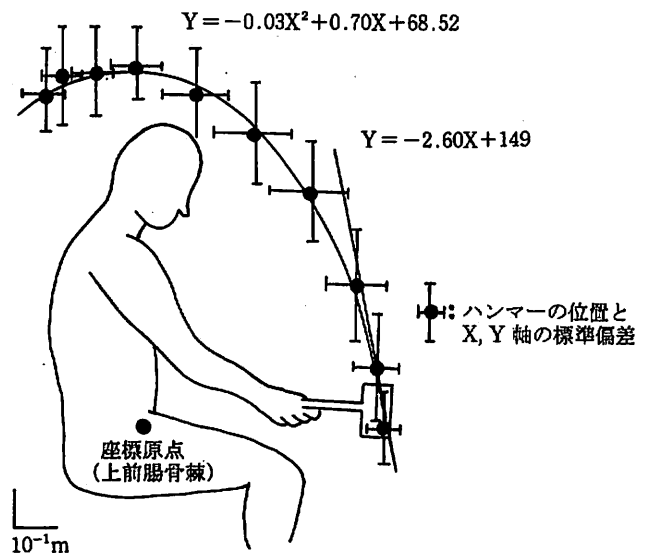


図4 ハンマー振り下ろし動作の軌跡と回帰式

画像までは、逆にX軸に対しY軸の変化が大きくなる様相を示した。従って2~7画像はハンマーが弧を描きながら、頭部の後方から前方へ振り下ろす2次式に近似した運動($Y = -0.03X^2 + 0.70X + 68.52$, $r = 0.75$)を示し、8画像からは叩打までは、目標物の打面に向かって真っ直ぐハンマーが振り下ろされる直線運動、1次式($Y = -2.60X + 149$, $r = 0.82$)で示すことができた。

2. ハンマーの叩打力

計測した算出叩打力・叩打反力・応打力(図5)につ

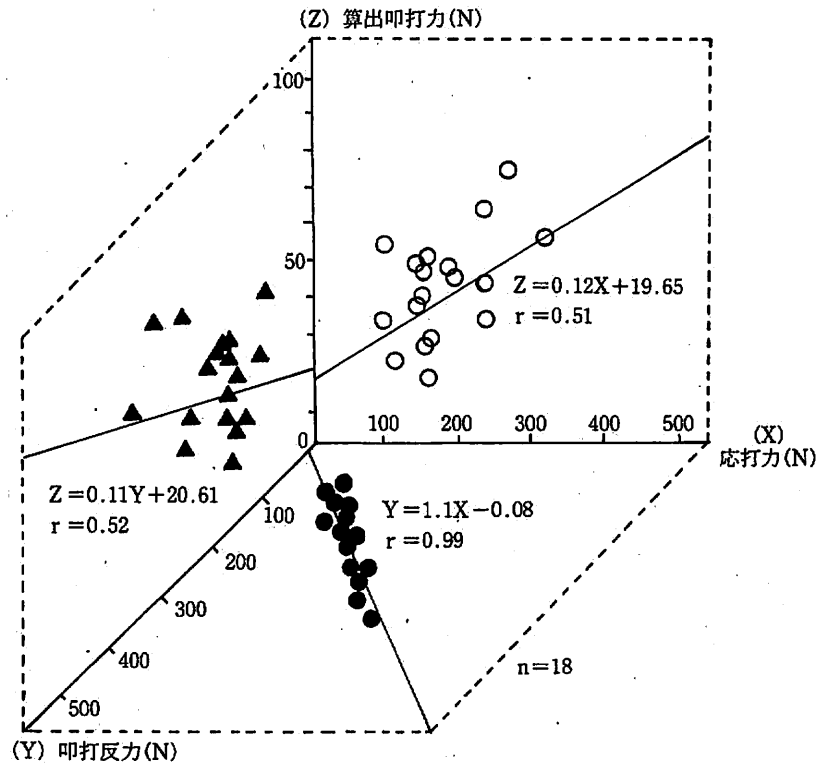


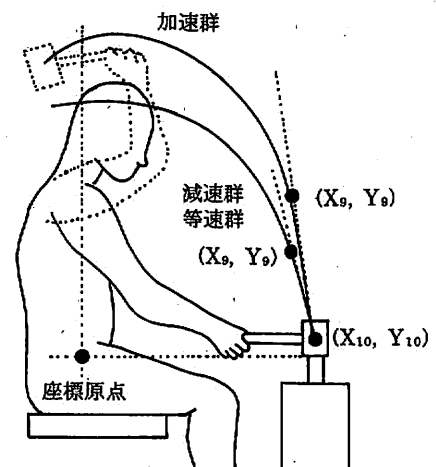
図5 算出叩打力・叩打反力・応打力の相互関係

いて、18名のデータと回帰直線式を示した。算出叩打力をZ軸方向に、応打力をX軸方向に叩打反力をY軸方向に配置した。Z軸上の算出叩打力は平均43.0Nとなり、X軸上の応打力は平均181.3N、Y軸上の叩打反力は平均187.2Nとなった。すなわち算出叩打力と応打力と叩打反力の各比率は、1 : 4.2 : 4.3の関係を示した。また計測した各叩打力の相関関係は、叩打反力と応打力の関係(図5)が1次式 $Y = 1.1X - 0.08$ ($r = 0.99$) で互いに高い相関を示した。一方算出叩打力と叩打反力の相関係数は0.52、算出叩打力と応打力の相関係数は0.51であった。

3. ハンマーの振り下ろし方の分類

振り下ろし方の違いを、ハンマーの運動加速度の変化から大きく3分類できた。すなわち振り下ろしの開始から徐々にハンマーの加速度が増し、叩打直前に加速度が最大に達し叩打した加速群(8名)、振り下ろしの中盤で加速度が最大に達し、後半で減速し叩打した減速群(6名)、更に振り下ろしの開始から叩打まで著しい加速の相がなく、ほぼ等速度で振り下ろし叩打した等速度群(4名)である。

各群のハンマーの軌跡(図6)は、減速群と等速群が互いに近似式($Y = -0.02X^2 + 0.05X + 59.65$)に当ては



| 分類 | 振り下ろしの軌跡 | (X ₉ , Y ₉)と打面の傾き |
|----------------------|--|--|
| 加速群 (n=8) | $Y = -0.03X^2 + 0.90X + 75.40$ ($r = 0.84$) | $\frac{\Delta X}{\Delta Y} = -2.3$ |
| 減速群 等速群 (n=10) | $Y = -0.02X^2 + 0.50X + 59.65$ ($r = 0.76$) | $\frac{\Delta X}{\Delta Y} = -1.6$ |

図6 振り下ろし動作の分類

まり、加速群は頂点の座標すなわち振り上げの高さが高い、近似式($Y = -0.03X^2 + 0.90X + 75.40$)を示した($p < 0.05$)。また叩打時(X_{10}, Y_{10})の座標点と叩打直前(X_9, Y_9)の傾きを1次式に当てはめると、加速群は一

2.3, 減速群, 等速群は-1.6となり加速群の傾きが大きかった。

考 察

1. ハンマーの軌跡

振り下ろし動作は, 2次回帰式と1次回帰式に当てはまることが示された。Gray⁴⁾は, ハンマーの軌跡を, 初心者と熟練者で比較しており, 初心者は肩を軸として円運動に近似した軌跡を示すのに対し, 熟練者は直線性の高い楕円運動に近似した軌道で振り下ろしたと報告している。今回, 初心者の学生では, 振り下ろし動作開始から約70%が, 円運動に近似した2次式($r=0.75$)で示され, 振り下ろし動作の後半約30%は, 1次式($r=0.82$)で示され, ハンマーの方向は修正され打点に向かう最適位置に収束した。

2. ハンマーの叩打力

算出叩打力は, 振り下ろされたハンマーの運動加速度とハンマー重量の積で求めた。算出叩打力は, 応打力と叩打反力に比べ小さかったが, 1:4.2:4.3の比率で示され, 映像からの叩打力の解析が可能であることが示された。

一方, ハンマーの柄で測定した叩打反力は, 陽性波形が叩打時にハンマーが打点を下方に押さえ付け, ハンマーの柄の上方に取り付けた歪みゲージが凸型に歪み最大伸張する相であり, 続いて生じる陰性波形は, 衝撃に対して逆にハンマーが撥ね返され, 歪みゲージが凹型に歪み最大伸張するまでの相であった。またロードセルで求めた応打力の出力波形は, 叩打直後1相性のピークを示し, ハンマーで生じた力がロードセルに加わり, 下方への力で歪みゲージが最大に歪むまでの力積(力×時間)を示した。

ロードセルと歪みゲージで計測した叩打力の相関($r=0.99$)は強く, 叩打反力と応打力の互いの測定方法の近似性を立証することができた。

今回, 叩打に用いた作業台は, 鉄製のアングルで組んだ台の上にロードセルを固定したものであるが, Schoenmaklin²⁾らの叩打力(20kN~30kN)の測定には, ロードセルで計測する際に, ロードセルと台の間に空気加圧によるショックアブソーバを設置して, 瞬時の衝撃力をショックアブソーバに吸収させ, 高速の反応を測定する

工夫を行っていた。今回, 我々が求めた叩打力は1/100以下の小さな値となり, この原因は弾発性の高い鉄製の固定台が, 瞬時の衝撃を一部撥ね返したこと, 高周波帯域の歪み(1 KHz以上)を歪みアンプでハイカットしたことなどが, 衝撃力の測定差を生じさせたと考えられ, 更に高速の現象に追従して測定できる実験システムの必要性が示唆された。

3. 振り下ろし動作の分類

運動加速度の変化量から分類すると, 叩打力の大きな者は, 高い位置から振り下ろされ, 叩打直前に運動加速度が, 叩打直前に最大に達する効率的な打ち方をする加速群と, 低い位置から振り下ろされ, 叩打直前に減速または, 等速度で振り下ろす非効率的な打ち方をする減速群, 等速群に分類できた。

更に叩打直前のハンマー(X_9, Y_9)と叩打時(X_{10}, Y_{10})の傾きを比較すると, 加速群は他の2群に比べて有意($p<0.05$)に高い傾きで目標物に叩打していた。すなわち傾きの係数が大きいほど真っ直ぐ目標物にハンマーが振り下され, 鉛直下方の力を加えていたことが分かった。

我々は既に上肢各関節の角加速度の測定から, 叩打力の大きな者は, 肩関節, 肘関節の順に加速し, 打点に衝突する直前に, 肘関節, 手関節の角加速度が最大値に達することを報告した¹⁾。Schoenmarklin²⁾は振り下ろしの運動エネルギーは, ハンマーが落下する移動エネルギー($1/2 MV^2$, M :ハンマーの重量, V :速度)に加えて, 手関節のSnappingすなわち回転エネルギー($1/2 IW^2$, I :ハンマーの慣性モーメント, W :角速度)が加わると大きな力を生じると報告している。従って加速群に代表される効率的な打ち方は, 肩・肘関節が主動する移動エネルギーに, 肘・手関節が主動する回転エネルギーが加わる加速した運動により, 大きな叩打力を産出したと考えられる。

今後, 臨床においては各種作業で用いるハンマー動作を, 画像と力学的側面から捉えた本システムで計測し, 患者の動作分析並びに上肢の機能評価として応用していきたい。

結 論

健常男性18名を対象として, ハンマーの振り下ろし動作を測定し, 叩打力を計算で求めた算出叩打力と歪みセ

ンサで測定した応打力と叩打反力の3方法で測定し比較した。

- 1) ハンマーの振り下ろし動作は $Y = -0.03X^2 + 0.70X + 68.52$ の2次式と $Y = -2.60X + 149$ の1次式で表すことが出来た。
- 2) 算出叩打力 (43.3N) と応打力 (181.3N) と叩打反力 (187.2N) との比率は 1 : 4.2 : 4.3 であり、各測定システムの妥当性を示すことができた。
- 3) 振り下ろしのハンマーの座標点と標準偏差並びにハンマーの加速度の変位から、各個人の打ち方の特徴を分類できた。

文 献

- 1) 柴田克之 他：ハンマー叩打動作における上肢関節角度の分析，作業療法，8：286-287，1989。
- 2) Schoenmarklin, R.W., et al. : Effect of handle angle and work orientation on hammering : I. wrist motion and hammering performance. HUMAN FACTORS 31 : 397-411, 1989.
- 3) Bishop, P.J., et al. : The inappropriateness of helmet drop tests in assessing neck protection in head-first impacts, Am J Sports Med 18 : 201-205, 1990.
- 4) Gray, B.A., et al. : An experimental analysis of railroad spike maul methods HUMAN FACTORS 31 : 335-344, 1989.
- 5) 田所 論 他：上肢運動の動作解析に関する研究—手首位置と肩の回転角の関係について—，人間工学，26：41-47，1990。
- 6) Konz, S. : Bent hammer handles. HUMAN FACTORS 28 : 317-323, 1986.
- 7) Marras, W, et al. : An experimental evaluation of method and tool effects in spike maul use. HUMAN FACTORS 28 : 267-281, 1986.

An experimental analysis of locus and spike force on downswing of the hammering performance.

Katsuyuki Shibata, Munehiro Ikuta, Kouji Nishikawa, Seiji Nishimura

Summary

The purpose of this study was to investigate the locus and spike force of the hammer stroke which is often used for the training of upper extremities in occupational therapy.

The subjects of this study were 18 healthy men.

The locus of hammer was recognized to reveal parabolic motion as a whole starting as a circle movement ($Y = -0.03X^2 + 0.70X + 68.52$) over the head of subjects in sagittal plane. And it turns to be a straight movement ($Y = -2.60X + 149$) toward the end of motion. The value in between predicted locus and measured locus was quite similar at the end of hammer stroke.

- ① Spike force was calculated by the locus of hammer stroke and
- ② Spike force was measured with a use of load cell, and
- ③ Applied force was measured with a use of strain gage equipped on the handle of a hammer. The applied force and repulsive force was 4.3 higher than calculated force.

The research clearly shows that the nature of factor (i. e., locus and spike force) significantly affect hammering performance.